

## Аппаратные решения по повышению качества процессов управления радиотелескопом РТ-7.5

© В.А. Польский, Ю.И. Рассадкин, А.В. Сеницын

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Представлены основные технические решения, направленные на повышение функциональных возможностей и точности наведения радиотелескопа, взамен морально и физически устаревшей системы управления. Вместо двухдвигательных электроприводов азимутальной и угломестной оси с двигателями постоянного тока и многоступенчатыми редукторами предложено использовать однодвигательные приводы на основе трехфазных асинхронных двигателей с одноступенчатым редуктором. Все элементы новых приводов имеют безлюфтовые (бесшпоночные) соединения. Для организации обратной связи предложено устанавливать цифровые датчики абсолютного отсчета, а для управления электродвигателями — векторные преобразователи частоты. Испытания усовершенствованного радиотелескопа подтвердили правильность принятых технических решений.*

**Ключевые слова:** радиотелескоп, система автоматического управления, привод наведения.

**Введение.** Расположенный на территории Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана радиотелескоп РТ-7.5 был построен в 1970-х годах для использования в научной работе и учебной практике. К началу 2000 г. стало очевидно, что требуется серьезная модернизация радиотелескопа, так как его оборудование к этому времени морально и физически устарело. Высокая степень износа не обеспечивала необходимую точность наведения. Кроме того, применение современных технических решений позволило бы повысить как точностные, так и скоростные характеристики системы управления радиотелескопом и таким образом расширить его возможности по наблюдению за небесными телами.

Радиотелескоп может работать в трех режимах: программного, регламентного и полуавтоматического наведения. В режиме программного наведения на входы следящих приводов подаются требуемые угловые координаты. В режиме регламентного наведения осуществляется проверка функционирования системы и настройка следящих приводов. Режим полуавтоматического наведения используется при проведении подготовительных и регламентных работ, при этом скорость движения задается оператором с пульта. Основные динамические характеристики системы приводов до и после модернизации приведены в таблице.

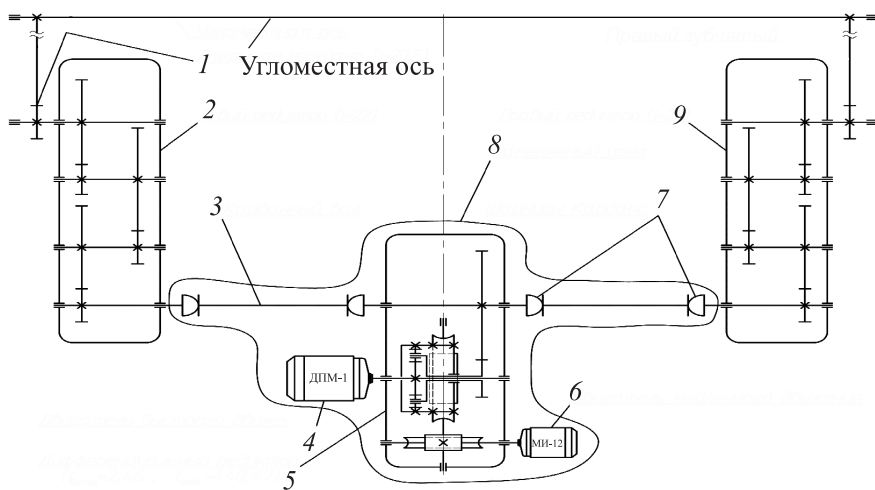
Динамические характеристики системы приводов

Режим наведения	Параметр	До модернизации		После модернизации*
		Азимут	Угол места	
Программное	Скорость, угл. с/с	0–205	0–325	2,5–9 000
	Ускорение, угл. с/с <sup>2</sup>	0–20,5	0–32,5	0–36
	Ошибка наведения, угл. с	< 10	< 10	< 2,5
Полуавтоматическое и регламентное	Скорость медленного движения, угл. с/с	3–205	3–325	2,5–9 000
	Скорость быстрого движения, угл. с/с	0–18 000	0–18 000	20–18 000
	Ускорение медленного движения, угл. с/с <sup>2</sup>	0–20,5	0–32,5	0–36
	Ускорение быстрого движения, угл. с/с <sup>2</sup>	0–1 800	0–1 800	0–1 800

\*Требуемые технические характеристики системы мехатронных модулей имеют одинаковые значения для азимута и угла места.

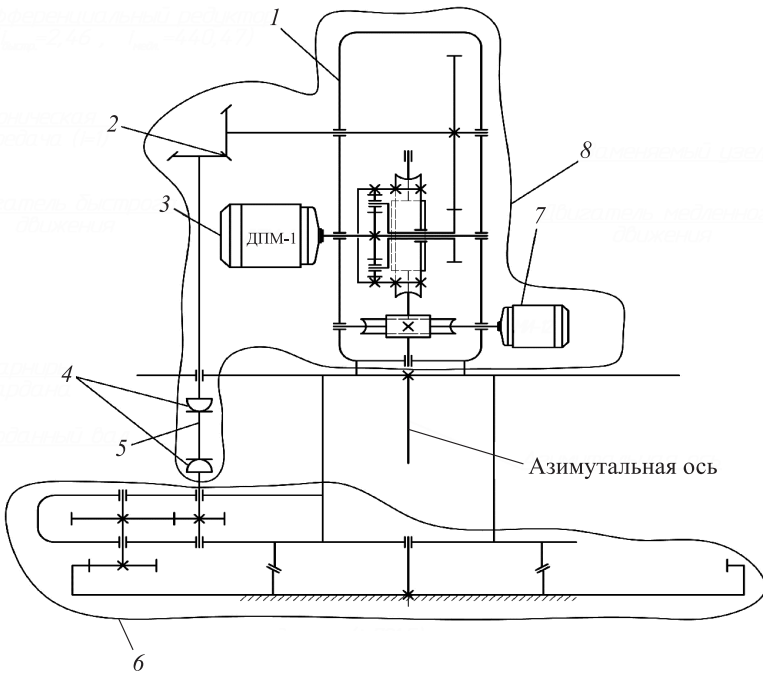
**Конструкция системы приводов до модернизации радиотелескопа.** Движение антенной установки по каждой оси вращения осуществлялось двухдвигательным электроприводом с механическим дифференциалом на базе двигателей постоянного тока, управляемых от электромашинных усилителей. Для передачи движения от двигателей к соответствующим осям вращения зеркала (угломестной и азимутальной) использовались механические трансмиссии (рис. 1, 2).

Анализ кинематических схем (см. рис. 1, 2) и результатов проведенного технического обследования механических трансмиссий



**Рис. 1.** Кинематическая схема механической трансмиссии угломестной степени подвижности до модернизации:

- 1 — открытая передача ( $i = 20,5$ ); 2, 9 — левый и правый редукторы ( $i = 22$ ); 3 — карданный вал; 4, 6 — двигатели быстрого и медленного движения соответственно; 5 — дифференциальный редуктор ( $i_{\text{быстр}} = 2,46$ ,  $i_{\text{медл}} = 440,47$ ); 7 — шарниры Кардана; 8 — заменяемый узел



**Рис. 2.** Кинематическая схема механической трансмиссии азимутальной степени подвижности до модернизации:

1 — дифференциальный редуктор ( $i_{\text{быстр}} = 2,46$ ,  $i_{\text{медл}} = 440,47$ ); 2 — коническая передача ( $i = 1$ ); 3, 7 — двигатели соответственно быстрого и медленного движения; 4 — шарниры Кардана; 5 — карданный вал; 6 — редуктор ( $i = 721,5$ ); 8 — заменяемый узел

показал, что наиболее критическими звеньями являются первичные дифференциальные редукторы обеих степеней подвижности с тремя ступенями редукции с зубчатыми колесами с невысоким классом точности. Все зубчатые колеса закреплены на валах посредством шпоночных соединений, таким же способом соединены с редуктором и выходные валы электродвигателей.

Поскольку приводы работали в составе следящих систем и имели частые реверсы, шпоночные соединения быстро изнашивались и требовали замены, что приводило к временному прекращению работы антенной установки. В этом заключался основной недостаток существовавшей системы приводов.

Функциональная схема системы управления мехатронного модуля наведения на примере угломестной оси представлена на рис. 3.

В состав системы управления входят: усилительно-преобразующее устройство, двигатель, система редукторов, нагрузка и датчик положения. Нагрузкой для привода азимутальной оси является азимутальная платформа, для привода по угломестной оси — зеркало антенной установки.

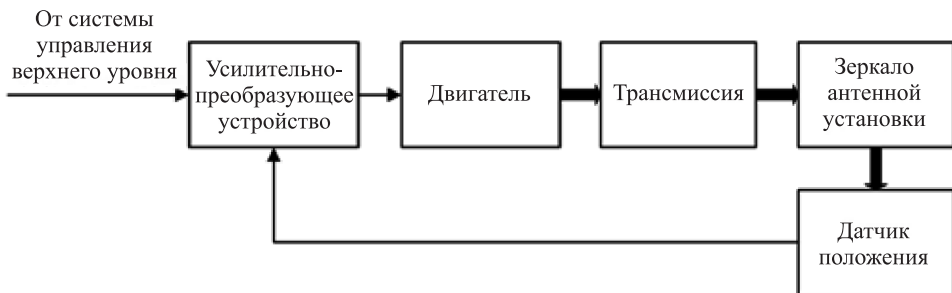


Рис. 3. Функциональная схема системы управления мехатронным модулем

**Модернизация механических передач.** Основной задачей в ходе модернизации являлось соответствие новым техническим требованиям и устранение многоступенчатой трансмиссии. В модернизированной системе (см. таблицу) максимальные скорости быстрого движения по обеим осям всего лишь в 2 раза больше максимальных скоростей медленного движения. В старой системе это соотношение составляло 88, поэтому и использовался двухдвигательный электропривод.

Для новой системы использование двухдвигательного привода было признано нецелесообразным. Предлагается перейти на однодвигательный привод, который должен иметь диапазон регулирования скорости порядка 7 200. Современные электродвигатели способны обеспечивать диапазон регулирования скорости до 50 000 и, следовательно, могут быть использованы для создания однодвигательного привода. Также преимущество перехода на однодвигательный привод заключается в возможности замены старых многоступенчатых дифференциальных редукторов новыми одноступенчатыми, в результате чего существенно уменьшается люфт и увеличивается жесткость механической передачи. Кроме того, массогабаритные показатели механических передач существенно уменьшаются, а точность передачи движения возрастает.

Для перехода к однодвигательному приводу необходимо оценить передаточные отношения для каждой степени подвижности при замене первичных дифференциальных редукторов новыми одноступенчатыми. Общие передаточные отношения можно оценить по следующим формулам:

$$i_y = \Omega_{\text{дв.у.ном}} / \Omega_{y \text{ max}} ; \quad (1)$$

$$i_a = \Omega_{\text{дв.а.ном}} / \Omega_{a \text{ max}} ; \quad (2)$$

где  $i_y$ ,  $i_a$  — общие передаточные отношения для угломестной и азимутальной степеней подвижности;  $\Omega_{\text{дв.у.ном}}$ ,  $\Omega_{\text{дв.а.ном}}$  — номинальные

скорости вращения двигателей угломестного и азимутального приводов;  $\Omega_{y \max}$ ,  $\Omega_{a \max}$  — максимальные скорости движения по углу места и по азимуту.

В свою очередь,  $i_y$  и  $i_a$  можно представить в виде

$$i_y = i_{y1} i_{y2}; \quad (3)$$

$$i_a = i_{a1} i_{a2}, \quad (4)$$

где  $i_{y1}$ ,  $i_{a1}$  — передаточные отношения редукторных модулей, не подлежащих замене по угломестной и азимутальной степеням подвижности, в данном случае  $i_{y1} = 451$ ,  $i_{a1} = 721,5$ ;  $i_{y2}$ ,  $i_{a2}$  — передаточные отношения новых одноступенчатых редукторов, которые должны заменить первичные дифференциальные редукторы.

В соответствии с (1)–(4) можно записать

$$i_{y2} = \Omega_{\text{дв. у. ном}} / (\Omega_{y \max} i_{y1}); \quad (5)$$

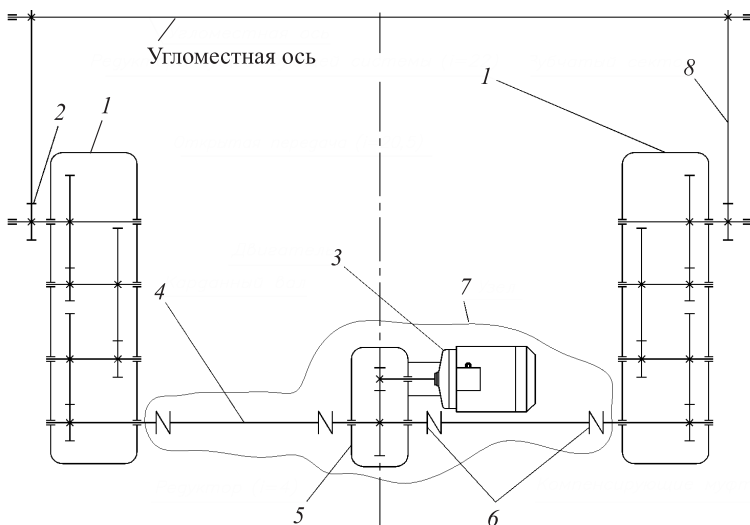
$$i_{a2} = \Omega_{\text{дв. а. ном}} / (\Omega_{a \max} i_{a1}). \quad (6)$$

Для минимизации массогабаритных характеристик новых редукторов было принято решение использовать двигатели переменного тока с частотой вращения холостого хода  $\Omega_{\text{дв.х.х}} = 1\,500$  об/мин при  $i_{y2} = 3,99$  и  $i_{a2} = 2,495$ . Такие передаточные отношения могут быть обеспечены одноступенчатыми редукторами.

Для угломестного привода выбран одноступенчатый редуктор с двухсторонним выходным валом с передаточным отношением  $i_{y2} = 4$ . Таким образом, общее передаточное отношение для угломестной степени согласно (3):  $i_y = 451 \cdot 4 = 1\,804$ . Кинематическая схема механической трансмиссии угломестной оси после выполнения работ имеет вид, представленный на рис. 4.

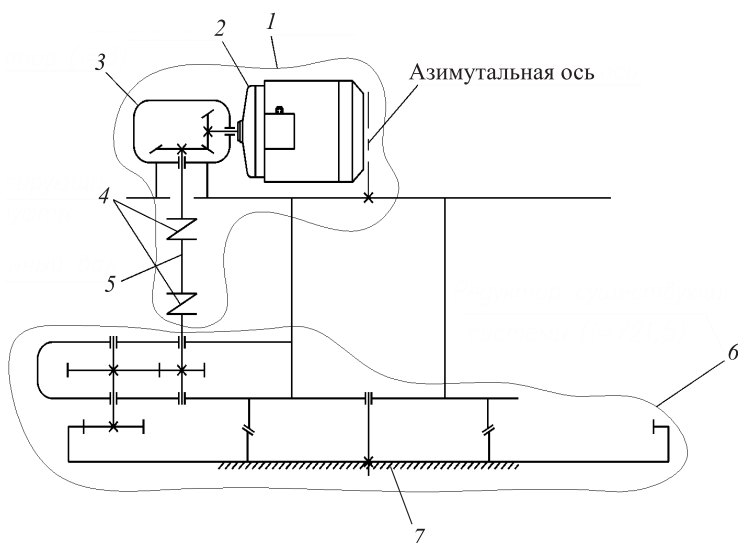
Для азимутального привода выбран одноступенчатый конический редуктор с передаточным отношением  $i_{a2} = 3$ . Общее передаточное отношение для азимутальной степени подвижности в соответствии с (4):  $i_a = 721,5 \cdot 3 = 2164,5$ . Кинематическая схема механической трансмиссии азимутальной оси после модернизации представлена на рис. 5.

При модернизации радиотелескопа использованы высокоточные редукторы фирмы Alpha Getricbe (Германия), имеющие высокую крутильную жесткость и плавность хода, а также небольшое значение люфта, не превышающие 3 угл. мин. Дополнительным достоинством данных редукторов является отсутствие шпоночной посадки зубчатых колес на валы.



**Рис. 4.** Кинематическая схема механической трансмиссии угломестной степени подвижности после модернизации:

1 — редукторы существующей системы ( $i = 22$ ); 2 — открытая передача ( $i = 20,5$ ); 3 — двигатель; 4 — карданный вал; 5 — редуктор ( $i = 4$ ); 6 — компенсирующие муфты; 7 — узел; 8 — зубчатый сектор



**Рис. 5.** Кинематическая схема механической трансмиссии азимутальной степени подвижности после модернизации

1 — узел; 2 — двигатель; 3 — редуктор ( $i = 3$ ); 4 — компенсирующие муфты; 5 — карданный вал; 6 — редуктор существующей системы ( $i = 721,5$ ); 7 — основание антенной установки

**Модернизация электродвигателей.** Современный уровень развития электродвигателей и средств управления ими привел к тому, что подавляющее большинство новых задач решается на основе электродвигателей переменного тока как наиболее технологичных и практичных вследствие отсутствия, как правило, подвижных контактов.

Среди выпускаемых в настоящее время двигателей переменного тока подходящими для использования в составе мехатронных модулей и наиболее отработанными являются трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором [1, 2].

Общепромышленные трехфазные асинхронные двигатели довольно дешевы, но имеют низкокачественные подшипниковые узлы, плохую балансировку ротора и не годятся для использования в высокоточных системах управления. В связи с этим было принято решение использовать специализированные высококачественные трехфазные асинхронные двигатели.

Двигатели переменного тока в системах высокоточных мехатронных модулей опорно-поворотных устройств радиотелескопов и радиолокаторов должны удовлетворять следующим требованиям:

- наличие электромагнитного тормоза для обеспечения отсутствия самохода в выключенном состоянии;
- наличие встроенного датчика скорости ротора с высокой разрешающей способностью для организации контуров регулирования по скорости и положению вала двигателя;
- наличие независимого охлаждения для обеспечения длительной работы на низких скоростях вращения;
- возможность работы в диапазоне рабочих температур  $-25...+40$  °С;
- возможность подключения к типовым устройствам управления (усилителям, промышленным преобразователям частоты и т. д.).

Как показала практика, при замене двигателей постоянного тока на трехфазные асинхронные двигатели их мощность должна быть на 10...15 % больше в связи с меньшей перегрузочной способностью. Поэтому при модернизации для обеих степеней подвижности выбраны специализированные трехфазные асинхронные двигатели фирмы КЕВ (Германия) мощностью 2,2 кВт вместо ранее применявшихся двигателей постоянного тока мощностью 1,8 кВт. Выходной вал двигателя является «гладким», что обеспечивает его безлюфтовое соединение с редуктором через встроенную обжимную муфту.

**Модернизация датчиков угловых перемещений.** Анализ требований к точности наведения антенного устройства до и после модернизации (см. таблицу) показал, что для обеспечения заданной точности  $\delta_{\max} = 2,5$  угл. с необходим датчик абсолютных значений угла, измеряющий угловые положения осей с точностью не ниже  $\Delta_{\max} \leq \delta_{\max} / 2 = 1,25$  угл. с.

Диапазон измеряемых углов составляет  $180^\circ$  для угломестной оси и  $360^\circ$  для азимутальной оси, причем разрешающая способность датчиков должна быть одинаковой. Исходя из диапазона измерения азимутального датчика ( $D_{\text{изм}} = 360^\circ$ ) и заданной точности измерения ( $\delta_{\text{max}} \leq 1,25$  угл. с), необходимое число разрядов датчика абсолютного отсчета

$$n_{\text{дат}} \geq \log_2 \frac{D_{\text{изм}}}{\delta_{\text{max}}} = \log_2 \frac{360 \cdot 3600}{1,25} = 19,983 \approx 20. \quad (7)$$

Таким образом, датчик абсолютного отсчета должен быть 20-разрядным. Помимо основной функции — измерения абсолютного угла — датчик также должен иметь дополнительный инкрементальный выход, позволяющий исключить проблемы, связанные с временным запаздыванием при получении и обработке текущей координаты в радиолокационных задачах слежения за низкоорбитальными космическими летательными аппаратами. Кроме того, он должен быть оснащен встроенной муфтой для сопряжения с осями антенной установки и стандартным интерфейсом.

Анализ датчиков, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, показал, что предъявляемым требованиям соответствует датчик RCN827 фирмы Dr. Johannes Heidenhein GmbH (Германия), поддерживающий обмен по высокопроизводительному протоколу ProfiBus DP (скорость 12 Мбит).

**Модернизация усилительно-преобразующих устройств.** Для управления выбранными электродвигателями необходимы векторные преобразователи частоты. Сформулированы следующие основные требования, предъявляемые к преобразователям частоты для мехатронных модулей опорно-поворотных устройств антенной установки: диапазон регулирования частоты вращения подключаемых двигателей не менее 7 200, управление электромагнитным тормозом, подключение внутреннего датчика скорости вращения ротора и внешнего датчика положения зеркала антенной установки, сопряжение с вычислительными средствами верхнего уровня управления по стандартным протоколам обмена, контроль состояния двигателя и собственного состояния, автоматическая настройка на подключаемый двигатель.

Рассматривали два типа преобразователей частоты, отвечающие указанным требованиям и примерно одинаковые по своим возможностям: АВ-100 (Россия) и КЕВ MULTI (Германия).

Упрощенная функциональная схема привода одной оси установки на базе выбранных преобразователей частоты приведена на рис. 6.



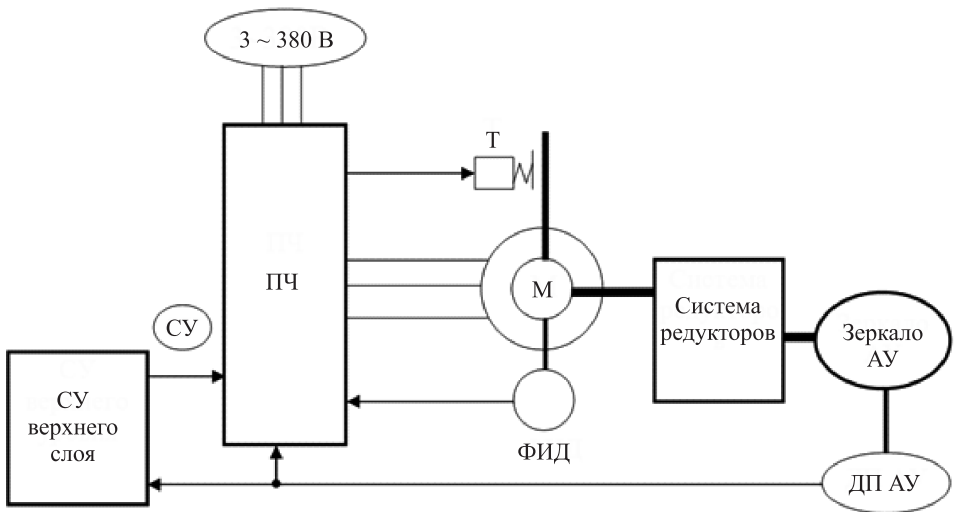


Рис. 6. Функциональная схема привода:

СУ — сигнал управления по скорости или положению, поступающий от системы управления верхнего уровня (может подаваться в трех видах: аналоговый сигнал, цифровое задание по интерфейсу RS-482, импульсное задание); Т — электромагнитный тормоз; М — собственно электродвигатель; ФИД — фотоимпульсный датчик на валу двигателя; ДП АУ — датчик положения на оси антенной установки; ПЧ — преобразователь частоты

**Заключение.** Модернизация радиотелескопа РТ-7.5 обеспечила соответствие системы наведения новым требованиям и позволила расширить его функциональность. В основу принятых технических решений положены возможности, предоставляемые современным уровнем развития мехатронной техники — двигателями, преобразователями, датчиками. Следует выделить несколько основных решений, которые могут быть также применены при модернизации аналогичных радиотелескопов с устаревшей системой приводов:

- замена двигателей постоянного тока с управлением от электромашинных усилителей на современные специализированные асинхронные двигатели с управлением от векторных преобразователей частоты;
- отказ от двухдвигательной схемы привода каждой оси с громоздким предварительным редуктором и переход на однодвигательную схему с диапазоном регулирования скорости 10 000 с компактным одноступенчатым редуктором;
- использование на осях антенной установки современных цифровых датчиков.

Испытания модернизированного радиотелескопа подтвердили правильность принятых технических решений и соответствие модернизированной системы управления предъявляемым требованиям [3].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соколовский Г.Г. *Электроприводы переменного тока с частотным регулированием*. Москва, Издательский центр «Академия», 2006, 272 с.
- [2] Блейз Е.С., Бродовский В.Н., Введенский В.А., ред. *Следящие приводы. Т. 2: Электрические следящие приводы*. Чемоданов Б.К., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 890 с.
- [3] Ле Ван Тхань, Польский В.А. Модернизация следящих электроприводов радиотелескопа РТ-7.5. *Экстремальная робототехника. Тр. 17-й науч.-техн. конф.* Санкт-Петербург, 2006, с. 539–546.

Статья поступила в редакцию 10.07.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Польский В.А., Рассадкин Ю.И., Сеницын А.В. Аппаратные решения по повышению качества процессов управления радиотелескопом РТ-7.5. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/rmrs/1424.html>



**Польский Вячеслав Анатольевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [polsky@rk10.bmstu.ru](mailto:polsky@rk10.bmstu.ru)



**Рассадкин Юрий Иванович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [rassadkin@sm.bmstu.ru](mailto:rassadkin@sm.bmstu.ru)



**Сеницын Алексей Витальевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [kutta@mail.ru](mailto:kutta@mail.ru)

## Hardware solutions to improve control system quality of radio telescope RT-7.5

© V.A. Polsky, Yu.I. Rassadkin, A.V. Sinitsyn

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article presents main technical solutions aimed at improving the functionality and accuracy of the telescope guidance, replacing obsolete control systems. It is suggested to use single-engine drives on the basis of three-phase asynchronous motors with single-stage reduction gear instead of twin-engine electric drives of azimuth and elevation axes with DC motors and multi-stage reduction gears. All the elements of new drives have a backlash-free connection. We offer to install the digital absolute encoder for providing feedback, and vector frequency inverters for electric motors controlling. Tests of the advanced radio telescope confirmed the correctness of the technical solutions taken.*

**Keywords:** radio telescope, control system, guidance drive.

### REFERENCES

- [1] Sokolovsky G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC Drives with frequency regulation]. Moscow, Academiya Publ., 2006, 272 p.
- [2] Blaise E.S., Brodovsky V.N., Vvedensky V.A., eds. *Sledyashchie privody* [Servo drives]. Chemoanov B.K., ed. Vol. 2. *Elektricheskie sledyashchie privody* [Electric servo drives]. Moscow, BMSTU Publ, 2003, 890 p.
- [3] Le Van Thanh, Polsky V.A. Modernizatsiya sledyashchikh elektroprivodov radioteleskopa RT-7.5 [Upgrading of follow-up motors of the radio telescope RT-7.5]. *Ekstremalnaya robototekhnika. Trudy 17-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [Extreme Robotics. Works of the. 17th scientific and engineering. Conf.]. Saint Petersburg, 2006, pp. 539–546.

**Polsky V.A.** (b. 1957) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1981. Cand Sci. (Eng.), associate professor, of the Special Robotics and Mechatronics Department at Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 papers in Robotics. e-mail : polsky@rk10.bmstu.ru



**Rassadkin Yu.I.**, Cand Sci. (Eng.), associate professor, of the Special Robotics and Mechatronics Department at Bauman Moscow State Technical University. e-mail: rassadkin@sm.bmstu.ru



**Sinitsyn A.V.**, Cand Sci. (Eng.), associate professor, of the Special Robotics and Mechatronics Department at Bauman Moscow State Technical University. e-mail : kutta@mail.ru

